

Uczniowska Kampania Klimatyczna, czyli jak uczniowie pomagają naukowcom badać klimat

Krzysztof Markowicz

1. Ogólne informacje o projekcie

Od wiosny 2013 roku realizowany jest w Polsce projekt edukacyjny Uczniowska Kampania Klimatyczna (<http://globe.gridw.pl/projekty/badawcza-kampania-klimatyczna/o-projekcie>). Jego celem jest integracja młodzieży szkolnej ze środowiskiem naukowym w ramach działań nad poprawą stanu wiedzy o procesach fizycznych odpowiedzialnych za zmiany klimatyczne.

Projekt ma na celu wykorzystanie potencjału uczniów szczególnie uzdolnionych w kierunku fizyki i geografii i umożliwienie im dalszego rozwoju pod opieką naukowców z Instytutu Geofizyki Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego oraz Instytutu Oceanologii Polskiej Akademii Nauk z Sopotu. Uczniowska Kampania Klimatyczna jest realizowana w ramach międzynarodowego programu edukacyjnego GLOBE (www.globe.gov, www.globe.gridw.pl), który jest koordynowany przez Centrum Informacji o Środowisku UNEP/GRID Warszawa.

Program GLOBE jest realizowany w Polsce od przeszło 15 lat w ponad 120 szkołach podstawowych, gimnazjalnych i ponadgimnazjalnych. W ramach projektu Uczniowska Kampania Klimatyczna wzbogacono i unowocześniono ofertę edukacyjną przeznaczoną dla uczniów, wykorzystując i rozwijając metodykę, a także materiały programu GLOBE i innowacyjne technologie informacyjne.

Program GLOBE łączy uczniów, nauczycieli i naukowców w działaniach na rzecz poznawania globalnych problemów środowiska.

W ramach programu GLOBE prowadzone są działania promujące zasady zrównoważonego rozwoju i polityki ekologicznej państwa. W ciągu całego roku uczniowie, pod nadzorem nauczycieli, prowadzą systematycznie badania lokalnego środowiska przyrodniczego w zakresie: atmosfery, hydrologii, gleb, pokrycia terenu (z wykorzystaniem zdjęć satelitarnych), badań biologicznych, fenologii, co zwiększa ich kompetencje w zakresie nauk przyrodniczych. Doświadczenie zdobyte w ramach programu GLOBE pozwala sądzić, że Uczniowska Kampania Klimatyczna może przynieść wymierne efekty nie tylko podczas procesu dydaktycznego w szkołach, ale również dla środowiska naukowego.

Podstawowym tematem projektu są aerozole atmosferyczne, czyli stałe i ciekłe zanieczyszczenia powietrza. Aerozole odgrywają kluczową rolę w bilansie energii Ziemi przez oddziaływanie na transfer promieniowania słonecznego i długofalowego w atmosferze oraz oddziaływanie na własności optyczne chmur („Fizyka w Szkole” nr 5/2013). Obecność aerozoli w atmosferze prowadzi do ochładzania się klimatu.

W ostatnich dziesięcioleciach obserwujemy ocieplenie się klimatu, gdyż aerozole jedynie zmniejszają ogrzewający wpływ stale rosnącego efektu cieplarnianego („Fizyka w Szkole” nr 5/2013). Ze względu na duże zróżnicowa-

nie źródeł emisji zanieczyszczeń i skomplikowane procesy atmosferyczne z udziałem aerozoli nasza wiedza o ich oddziaływaniu na system klimatyczny jest niewielka.

Szczególnie jest to widoczne w Polsce, gdzie stacji badawczych, w których prowadzi się badania w tej dziedzinie, jest znacznie mniej niż w innych krajach Unii Europejskiej. Dodatkowo w Polsce poziom zanieczyszczeń atmosfery jest relatywnie wysoki w porównaniu z innymi krajami Europy, a zatem wpływ aerozoli, zwłaszcza pochodzenia antropogenicznego, na lokalny klimat jest szczególnie istotny.

Obecnie jedynie w czterech stacjach badawczych, należących do sieci naukowej Poland-AOD (www.polandaod.pl), zlokalizowanych w Sopocie, Warszawie, Belsku (koło Grójca) oraz Strzyżowie na Podkarpaciu, prowadzone są eksperymentalne badania aerozoli pod kątem ich wpływu na system klimatyczny. Ze względu na silne zróżnicowanie stopnia zanieczyszczenia powietrza liczba punktów pomiarowych jest niestarczająca. Dlatego rozszerzenie pomiarów o szkolny monitoring aerozoli jest bardzo interesujące z punktu widzenia badań nad aerozolami w naszym kraju.

Zasadniczym celem naukowym projektu jest pogłębienie wiedzy o czasoprzestrzennej zmienności grubości optycznej aerozoli (parametru opisującego zwartość aerozoli w pionowej kolumnie całej atmosfery), a szczególnie:

- określenie wpływu aglomeracji miejskich na grubość optyczną aerozoli;

- zweryfikowanie i poprawienie danych pochodzących z obserwacji satelitarnych w celu określenia zmienności przestrzennej grubości optycznej aerozoli w małej skali;
- dostarczenie danych do późniejszych analiz oraz symulacji klimatycznych.

Jeśli chodzi o edukację i popularyzację badań naukowych, celem projektu jest upowszechnianie aktualnej wiedzy o głównych przyczynach zmian klimatu Ziemi przez:

- poprawę stanu wiedzy społeczeństwa o procesach fizycznych wpływających na system klimatyczny;
- unowocześnienie procesu dydaktycznego dotyczącego zmian klimatu, który obecnie nie uwzględnia aktualnej wiedzy;
- rozwijanie zainteresowań i inspirowanie młodzieży do samodzielnego rozwoju i zgłębiania zagadnień z zakresu badań naukowych;
- zachęcenie młodzieży szkolnej do prowadzenia badań naukowych;
- umożliwienie osobistych kontaktów młodzieży szkolnej z naukowcami;
- upowszechnianie działań naukowych podejmowanych w ramach projektu w prasie, mediach elektronicznych i portalach społecznościowych.

Zadania realizowane w ramach projektu pozwolą lepiej zrozumieć świat, w którym żyjemy, i przyczynią się do rozwoju umiejętności potrzebnych do kształtowania zachowań i stylu życia zgodnych z ideą zrównoważonego rozwoju oraz sprzyjających zrozumieniu zmian zachodzących w otaczającym nas środowisku (np. zmian klimatycznych). Obserwacja najbliższego otoczenia uczy odpowiedzialności za działania podejmowane w środowisku i na jego rzecz. Wzmacnia stosunki partnerskie między młodzieżą a społecznością lokalną w zakresie rozwiązywania proble-

mów środowiskowych, tworząc grupę młodych, zaangażowanych ekspertów rozumiejących idee edukacji dla zrównoważonego rozwoju.

2. Główne etapy projektu

Uczniowska Kampania Klimatyczna składa się z trzech etapów. Celem pierwszej części projektu jest wyznaczenie oraz scharakteryzowanie obszaru badań atmosferycznych ze szczególnym uwzględnieniem czynników, które wpływają na emisję, rozprzestrzenianie się oraz depozycję zanieczyszczeń. W ramach tych działań uczniowie określają warunki naturalne: ukształtowanie oraz rodzaj pokrycia terenu, które mają znaczenie z punktu widzenia kumulacji zanieczyszczeń oraz emisji aerozoli naturalnych, takich jak aerozol morski, pyły mineralne (erozja gleb) czy aerozol emitowany podczas pożarów suchej trawy lub lasów.

Dzięki wykorzystaniu nowoczesnych aplikacji mapowych oraz obserwacji wizualnych uczniowie będą rozpoznawali antropogeniczne źródła zanieczyszczeń, takie jak: elektrociepłownię, fabryki, główne drogi czy gospodarstwa domowe. Scharakteryzują najważniejsze źródła emisyjne w promieniu 10 km, które mają największy wpływ na jakość powietrza na badanym terenie. Informacje zgromadzone podczas tego etapu będą niezbędne w dalszych pracach prowadzonych w kolejnych etapach badań, w tym do interpretacji wyników.

W ramach drugiego etapu projektu uczniowie wykonują kilka doświadczeń fizycznych przedstawiających procesy klimatyczne. W skład tych eksperymentów wchodzi: wyznaczenie efektu cieplarnianego oraz aerozoluowego, wyznaczenie bilansu energii i albedo powierzchni Ziemi, wyznaczenie masy optycznej atmosfery oraz temperatury i wysokości podstawy chmur. Celem tych zadań jest przybliżenie uczniom podstawowych pojęć z zakresu proce-

sów fizycznych prowadzących do zmian. Uczniowie korzystają z prostych pomocy naukowych oraz dwóch przyrządów pomiarowych (pirometru i luksomierza).

Ostatni etap projektu obejmuje regularne pomiary atmosferyczne, których celem jest pozyskanie danych na temat stopnia zanieczyszczenia atmosfery. W tym celu wykorzystane zostaną zarówno obserwacje wizualne, jak i pomiary prowadzone prostymi przyrządami. Mimo że aerozole atmosferyczne są cząstkami na tyle małymi, że są niewidoczne gołym okiem, to jednak ich obecność w powietrzu jest zauważalna. Uczniowie będą oceniali stopień zapylenia atmosfery przez obserwacje koloru nieboskłonu, szacowanie widzialności poziomej na podstawie tzw. reparów. Ponadto będą mierzyć grubość optyczną aerozoli przy użyciu fotometru słonecznego, widzialność za pomocą aparatu cyfrowego oraz zawartość pary wodnej przy użyciu pirometru. Dodatkowo prowadzone będą obserwacje podstawowych parametrów meteorologicznych (temperatura powietrza, wilgotność, kierunek wiatru, zachmurzenie, opady), które mają istotne znaczenie z punktu widzenia procesów fizycznych z udziałem aerozoli atmosferycznych. Prowadzone pomiary będą przez uczniów analizowane oraz wysyłane do bazy danych znajdującej się w Instytucie Geofizyki Uniwersytetu Warszawskiego.

3. Wybrane doświadczenia i regularne pomiary wykonywane w ramach projektu

Pełny opis doświadczeń oraz regularnych pomiarów atmosferycznych dostępny jest na stronie <http://www.igf.fuw.edu.pl/~kmark/Poland/AOD/Badania.php>. Na kolejnych stronach przedstawiono opis wybranych doświadczeń oraz pomiarów wykonywanych w ramach projektu Uczniowska Kampania Klimatyczna. Szkoły zainteresowane przystąpi-

niem do projektu prosimy o kontakt e-mailowy: kmark@igf.fuw.edu.pl.

3.1. Wyznaczanie bilansu energii i efektu cieplarnianego

Bilans energii jest podstawowym pojęciem fizycznym, który wpływa na temperaturę. Dodatni bilans energii mówi nam, że dana warstwa powietrza, wody lub gleby otrzymuje więcej energii, niż jej oddaje otoczeniu, co powoduje, że się ogrzewa. Ujemny bilans jest związany z większym ubytkiem energii, co prowadzi do ochłodzenia. Głównym składnikiem bilansu energii powierzchni Ziemi są strumienie radiacyjne, które mają postać:

$$B = F_S^{\downarrow} + F_{IR}^{\downarrow} - (F_S^{\uparrow} + F_{IR}^{\uparrow}), \quad (1)$$

gdzie po stronie zysków stoją: docierające promieniowanie słoneczne F_S^{\downarrow} oraz promieniowanie podczerwone F_{IR}^{\downarrow} , po stronie strat zaś odbite promieniowanie słoneczne F_S^{\uparrow} oraz emitowane przez powierzchnię Ziemi promieniowanie podczerwone F_{IR}^{\uparrow} . Poza czynnikami radiacyjnymi o bilansie energii powierzchni Ziemi decydują w mniejszym stopniu strumienie konwekcyjne ciepła odczuwalnego oraz utajonego, ale bardzo trudno jest je zmierzyć i nie można ich wyznaczyć w warunkach szkolnych.

Wyznaczenie bilansu energii w przypadku obecności gazów cieplarnianych oraz w atmosferze pozbawionej gazów cieplarnianych pozwala oszacować efekt cieplarniany. Niestety nie jest możliwe wykonanie pomiarów w drugim przypadku, tak więc do oszacowania bilansu energii w atmosferze pozbawionej gazów cieplarnianych stosuje się modele numeryczne. Innym rozwiązaniem, które może być stosowane w celach edukacyjnych, jest wykorzystanie płytki pleksi lub szyby, które podobnie jak gazy cieplarniane przepuszczają promieniowanie słoneczne, ale zatrzymują promieniowanie ciepłe.

Do pomiaru promieniowania słonecznego (F_S^{\downarrow} oraz F_S^{\uparrow}) będziemy używać luksomierza. Jest to przy-



Fot. 1. Luksomierz DT-1301, a) miernik uniwersalny ze wzmacniaczem; b) głowica fotometryczna



Fot. 2. Pirometr kompaktowy PIR 882-C

rzęd zaprojektowany do pomiaru natężenia oświetlenia. Przy użyciu luksomierza mierzy się natężenie oświetlenia w zakresie spektralnym zbliżonym do ludzkiego oka. Natężenie oświetlenia w pomieszczeniach zamkniętych wynosi od stu do kilkuset luksów, podczas gdy natężenie oświetlenia przez tarczę słoneczną może sięgać nawet 100 tys. lx. Luksomierz może być stosowany do pomiarów w domu, pracy, szkole, przy hodowli roślin i zwierząt oraz do celów inspekcyjnych pomieszczeń, w których pracują lub przebywają ludzie, w fotografii itp. W naszym przypadku będziemy go używać do pomiarów promieniowania słonecznego, którego jednostką jest W/m^2 . Przeliczenie natężenia oświetlenia I_0 na natężenie promieniowania słonecznego F_S jest wykonywane przy użyciu prostego wzoru uwzględniającego znaną stałą kalibracyjną $C = 9,15 W/m^2/klx$ dostarczoną z przyrządem:

$$F_S = C \cdot I_0. \quad (2)$$

Drugim przyrządem, który będzie wykorzystany podczas obserwacji bilansu energii, jest pirometr. Przyrząd ten służy do bezdotykowego pomiaru temperatury. Pirometr mierzy natężenie energii emitowanej przez ciała w określonej jednostce czasu przez pomiar temperatury elementu, na który pada promieniowanie termiczne (termoparę). W doświadczeniu można stosować dowolny pirometr umożliwiający pomiar temperatury w zakresie od -50 do $+100^\circ C$ lub większym.

Na podstawie temperatury t zmierzonej pirometrem wyznaczamy natężenie promieniowania podczerwonego F_{IR} zgodnie z prawem Stefana–Boltzmanna:

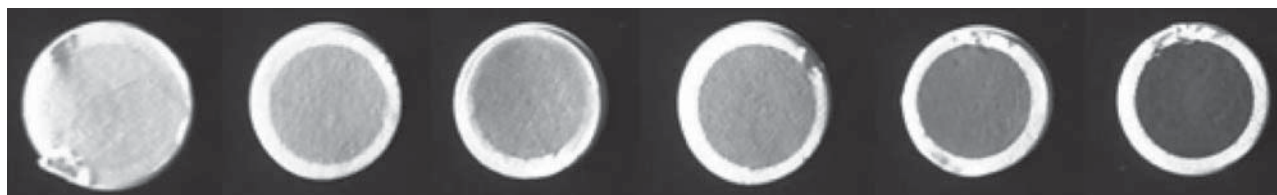
$$F_{IR} = \varepsilon \sigma \cdot (t + 273)^4, \quad (3)$$

gdzie:

σ – stała Stefana–Boltzmanna, $5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2/K$;

ε – zdolność emisyjna pryzmowana w większości pirometrów 0,95.

Przy użyciu obu przyrządów możemy wyznaczyć wszystkie składniki bilansu radiacyjnego (wzór 1), kierując pirometr i luksomierz bezpośrednio w stronę zenitu lub pionowo w dół. Doświadczenie z pomiarem efektu cieplarnianego polega na wykonaniu dodatkowych pomiarów w dwóch przypadkach. W pierwszym – gdy płytka znajduje się między powierzchnią Ziemi a przyrządami. W ten sposób obserwujemy redukcję promieniowania podczerwonego emitowanego przez powierzchnię Ziemi. Wykonany pomiar będzie analogiczny do obserwacji satelitarnych, które służą do pomiarów promieniowania ponad warstwą gazów cieplarnianych i szacowania, jaka część energii pozostaje w atmosferze. W drugim przypadku płytka znajduje się powyżej przyrządów i w ten sposób symulujemy zmianę bilansu powierzchni Ziemi przez gazy cieplarniane znajdujące się w atmosferze. W tym przypadku promieniowanie podczer-



Fot. 3. Przykładowe zabrudzenie filtrów kwarcowych związanych z obecnością aerozoli absorbujących w atmosferze [2]

wone skierowane od nieboskłonu do powierzchni Ziemi jest większe w obecności gazów cieplarnianych, co skutkuje wzrostem temperatury powietrza przy powierzchni Ziemi. Ćwiczenie najlepiej jest wykonać w słoneczny dzień, gdy powierzchnia Ziemi ma wysoką temperaturę.

3.2. Pomiar aerozoli absorbujących

Obecność aerozoli w atmosferze prowadzi do ochładzania się systemu klimatycznego w skali globalnej. Nie wszystkie aerozole chłodzą klimat w jednakowym stopniu, a niektóre nawet ogrzewają atmosferę. Aerozole, które ocieplają powietrze, nazywamy aerozolami absorbującymi, gdyż pochłaniają znaczną część promieniowania słonecznego. Najbardziej absorbującym typem aerozoli jest sadza, która jest emitowana do atmosfery podczas niepełnego spalania związków organicznych.

Aerozole absorbujące emitowane są do atmosfery wskutek działalności człowieka, ale również podczas pożarów, które wybuchają w sposób naturalny. Sadza jest także bardzo niebezpieczna dla naszego zdrowia, ponieważ jej bardzo drobne cząstki mogą z łatwością dostać się do dolnych dróg oddechowych, a w płucach do krwiobiegu.

Z tego powodu monitoring takich cząstek jest bardzo ważny. Niestety w Polsce tego typu pomiary należą do rzadkości. Pomiar aerozoli absorbujących (ang. *black carbon*) wykonane zostaną przy użyciu prostej techniki opartej na badaniu stopnia zabrudzenia filtra kwarcowego (fot. 3).

Przepuszczając przez biały filtr powietrze zawierające drobne aerozole, możemy zauważyć, że po-

wierzchnia filtra zmienia kolor. Im bardziej powietrze jest zanieczyszczone aerozolami absorbującymi, tym ciemniejszy będzie obszar zabrudzonego filtra. W ten sposób możemy ocenić, jak dużo tych aerozoli zawiera powietrze. Posłużymy się w tym przypadku przyrządem, który będzie składał się z małej pompki powietrza, uchwytu do zainstalowania filtra, filtra kwarcowego oraz zasilacza. Powietrze zasysane jest w tym układzie przez specjalną rurkę, a następnie przepływa przez filtr, trafiając do pompki ssącej. Prędkość przepływu powietrza wynosi w omawianym układzie ok. 0,6 litra na minutę. Jednak może być zmniejszona w obszarach o bardzo silnym zanieczyszczeniu powietrza, aby zaciemnienie filtra nie było za każdym razem maksymalne. Średnica obszaru filtra, na którym będzie osadzał się aerozol, wynosi ok. 2 cm. Pomiar trwa ok. 24 godzin. Po upływie tego czasu wy-

ciągamy zabrudzony filtr i zakładamy nowy. Stopień zabrudzenia filtra będzie mierzony za pomocą zwykłego aparatu cyfrowego bądź telefonu komórkowego wyposażonego w matrycę do robienia zdjęć.

Po zgraniu zdjęcia do komputera wykorzystujemy specjalne oprogramowanie, które odczytuje intensywność światła odbitego od zabrudzonej części filtra. Intensywność ta jest przeliczana na masę cząstek absorbujących w jednostce objętości, zgodnie z krzywą kalibracyjną. Stosowaną jednostką w tym przypadku jest $[mg/cm^3]$.

W czystych masach powietrza koncentracja cząstek absorbujących jest na ogół poniżej $1 mg/cm^3$, podczas gdy w warunkach rozwoju smogu przekracza $10 mg/cm^3$. Najwyższe wartości tej wielkości są obserwowane w Polsce w chłodnej porze roku w Krakowie oraz na Górnym Śląsku. Opisany powyżej przyrząd pomiarowy zwany aethalometrem może być wykonany w warunkach szkolnych



[2], ale jego koszt jest względnie wysoki (wynosi ok. 1500 zł). Wynika to z faktu, że pomiar wymaga użycia stabilizowanego przepływu powietrza oraz wysokiej jakości filtrów kwarcowych.

3.3. Pomiary widzialności i zmętnienia powietrza

Widzialność atmosferyczna określona jest przez własności optyczne atmosfery oraz rozkład przestrzenny promieniowania słonecznego. Głównymi składnikami atmosfery ograniczającymi widzialność są hydrometeory (produkty kondensacji pary wodnej, takie jak deszcz, śnieg, mżawka). Jednak w przypadku ich braku widzialność może być znacznie ograniczona za sprawą aerozoli atmosferycznych zawartych w powietrzu. W skrajnych przypadkach zanieczyszczenia powietrza mogą redukować widzialność poniżej 1 km.

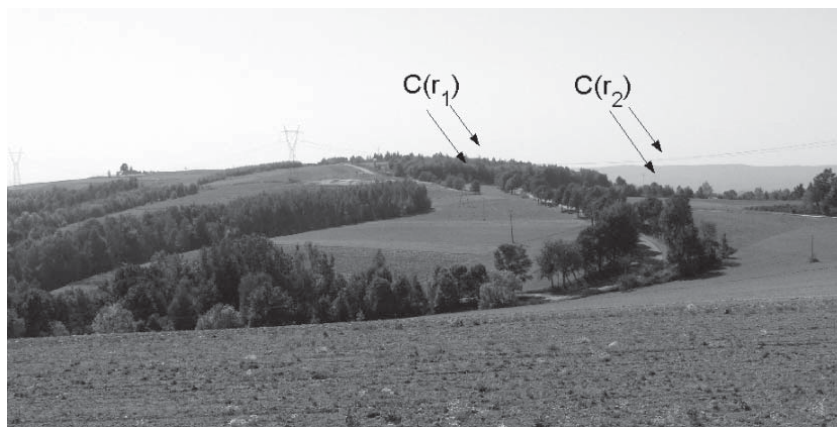
Do szacowania widzialności potrzebujemy jedynie średniej jakości aparatu cyfrowego oraz specyficznego ukształtowania terenu. Główną kwestią są naturalne lub sztuczne przeszkody terenowe widoczne w odległości minimum 5–10 km. Optymalną sytuację mamy, gdy z okolic szkoły widoczne są dwa pasma wzniesień znajdujące się w różnych odległościach (fot. 4).

W przypadku, gdy widoczny jest jedynie jeden obiekt, musimy zaplanować wycieczkę i wykonać zdjęcia obiektu z dwóch różnych odległości. W tym przypadku musimy jednak pamiętać, aby warunki oświetleniowe nie zmieniły się znacząco w czasie wykonywania obu zdjęć.

Aby wyznaczyć widzialność, musimy wprowadzić pojęcie kontrastu, który opisuje ilościowo różnicę między obiektem a jego tłem [3]. Kontrast obiektu w zerowej odległości jest zdefiniowany następująco:

$$C(0) = \frac{I_t(0) - I_b(0)}{I_b(0)}, \quad (4)$$

gdzie $I_t(0)$ oraz $I_b(0)$ to natężenie światła odbitego (rozproszonego) od



Fot. 4. Definiowanie kontrastu lasu dla dwóch pasm wzniesień w rejonie Podkarpacia. Zabarwienie niebieskie coraz dalszych obiektów jest związane z silnym rozpraszaniem fal najkrótszych w atmosferze. W rzeczywistości obiekty nie są niebieskie, a jedynie efekty atmosferyczne zmieniają ich pozorny wygląd; fot. K. Markowicz

obektu oraz natężenie światła tła.

W przypadku obiektów o zerowym współczynniku odbicia (obiekt czarny) kontrast wynosi -1 . Analogicznie kontrast w odległości r wyraża się wzorem:

$$C(r) = \frac{I_t(r) - I_b(r)}{I_b(r)}. \quad (5)$$

Wraz ze wzrostem odległości, ze względu na procesy rozpraszania i absorpcji światła w atmosferze, wartość bezwzględna kontrastu zmniejsza się (dąży do zera).

Oslabienie kontrastu wraz z oddalaniem się od obiektu opisuje prawo wykładnicze w postaci:

$$C(r) = C(0)\exp(-\sigma r), \quad (6)$$

gdzie:

σ – współczynnik ekstynkcji [1/km];
 r – odległość w [km].

Wielkość ta opisuje własności optyczne powietrza uwzględniające procesy rozpraszania oraz pochłaniania światła. Im większa jest ekstynkcja, tym silniejszy jest spadek kontrastu wraz z odległością. Zakładając redukcję kontrastu do

2% (średnio człowiek rozpoznaje obiekty, gdy mają one kontrast powyżej 0,02), czyli:

$$C(r) = 0,02C(0), \quad (7)$$

otrzymujemy wzór na widzialność VIS wyprowadzony przez Koschmiedera w 1921 roku:

$$\text{VIS} = \frac{\ln 50}{\sigma}. \quad (8)$$

Na podstawie wzorów (8) i (6) możemy wyznaczyć widzialność oraz ekstynkcję powietrza. Wielkości te mówią nam o przejrzystości powietrza, a tym samym o stopniu zanieczyszczenia powietrza znajdującego się blisko powierzchni Ziemi. Typowa widzialność poza okresami występowania opadów sięga od 10 do 50 km. Redukcja widzialności poniżej 10 km świadczy o znacznym zanieczyszczeniu powietrza, a wzrost widzialności powyżej 100 km jest związany z napływem arktycznej lub polarnomorskiej masy powietrza zawierającej bardzo małe ilości aerozoli.

LITERATURA

- [1] Markowicz K., *Efekt cieplarniany czy chłodzenie aerozolewo?*, „Fizyka w Szkole” 2013, nr 5.
- [2] Ramanathan N. i in., *A cellphone based system for large-scale monitoring of black carbon*, Atmos. Environ. 2011, Vol. 45, <http://www.ramanathan.ucsd.edu/files/pr181.pdf> [dostęp: 25.02.2014].
- [3] Markowicz K., *Amatorskie pomiary meteorologiczne: pomiar widzialności i współczynnika ekstynkcji*, „Delta” 2010, nr 5, <http://mimuw.edu.pl/delta/artykuly/delta2010-05/2010-05-pomiary.pdf> [dostęp: 25.02.2014].